# 半導体素子は真空管と同等の音質を持つか？

# 半導体2石による ロフチン・パワー・アンプの製作

山崎　浩

30数年前，上杉佳郎氏の手書きトランジスタ式シングル・アンプ設計図（第1図）を入手しました．出力トランス付きで出力素子にはラインオペレート用の高圧メサ形トランジスタが指定されていました．

当時，トランジスタ式SEPP用の出力マッチング・トランスは市販されていましたが，低出力インピーダンス用（例えば6C33用に1次側600Ω）のシングル・トランスはなく，この設計例も公表されなかったと思います（未発表の回路図を引用したことお詫び致します）．

当時は差動入力全段直結純コンの時代で，測定値で性能を評価する傾向は現在よりずっと強く，帯域の広さとひずみ率競争の真最中でした．重いトランス付きシングルの狭帯域半導体式アンプはむしろ新鮮で，当時かけだしの回路設計者だった私には強烈なイメージとして残りました．

## 半導体式ロフチン・ホワイト製作の意図

半導体素子は真空管に比べ多くの曖昧さを持っています．トランジスタ（transfer resistor）の電気伝導度は単に電圧に応答して変化するだけでなく，温度，磁場，圧力，光などにも敏感です．素子数に比例して曖昧さ，不安定性は増します．多数の素子で構成され抜群の安定性を誇るオペアンプもモノリシックICなればこそであって，同じ回路をディスクリートで構成しても同じ性能が得られる訳ではありません．

所定の特性を得ることを前提とし，部品点数，とくに増幅に関わる半導体素子数は少ないに越したことはありません．

上杉氏が設計したトランジスタ式シングルから思い出されるのは，真空管式のロフチン・ホワイト（第2図）です．ロフチン・ホワイトは増幅に関わる真空管が2本と少なく，しかも音が良い回路としてアマチュアに根強い人気があります．

シンプルさの究極は単球（単管）式あるいは1石式ですが，2球あるいは2石構成は電圧増幅段と電力増幅段を分離することで，たんに高い電圧利得が得られるだけでなく，歪打消しにより Hi-Fi アンプを実現できる可能性があります．

部品同士の接続箇所すなわち接点には必ず異種材料が介在します．接点の電圧-電流特性がすべてオーム接触*と割り切るのは安直に思います．

とくにアンプの増幅を受け持つ半導体素子内の接点を見過ごしては片手落ちです．シリコンチップのエミッタ，ベース，コレクタあるいはソース，ゲート，ドレイン電極取り出し部のシリコンは単結晶ではなく多結晶あるいは非晶質で，多量の不純物を含みます．不純物なしでは電極

取り出し部のオーミック性*が得られないからです．増幅段の素子数を少なくするほど，音質に影響する接点数も少なくなります．

増幅に関わる半導体素子のPN接合付近の不純物と音質との関係は興味ある点です．銅の純度が6N, 7N, 8Nなどのケーブルにおいてさえ音質への影響を取りざたされていますが，半導体素子を高耐圧化するには接合付近の不純物を少なくする必要があります．

〈第1図〉上杉佳郎氏設計トランジスタ式シングル・アンプ回路

素子構造にも関係しますが，耐圧が50V程度では6Nにも遠く及びません．バイポーラ・トランジスタに高圧をかけるとコレクタ-ベース間の空乏層が広がり，コレクタ-ベース間容量Cobは減少し高域特性は伸びますが，このふる舞いは接合付近のドーピング濃度（不純物量）によって決まります．このアンプにおいて不純物の少ない高耐圧素子に高圧を印加することは目的の1つです．

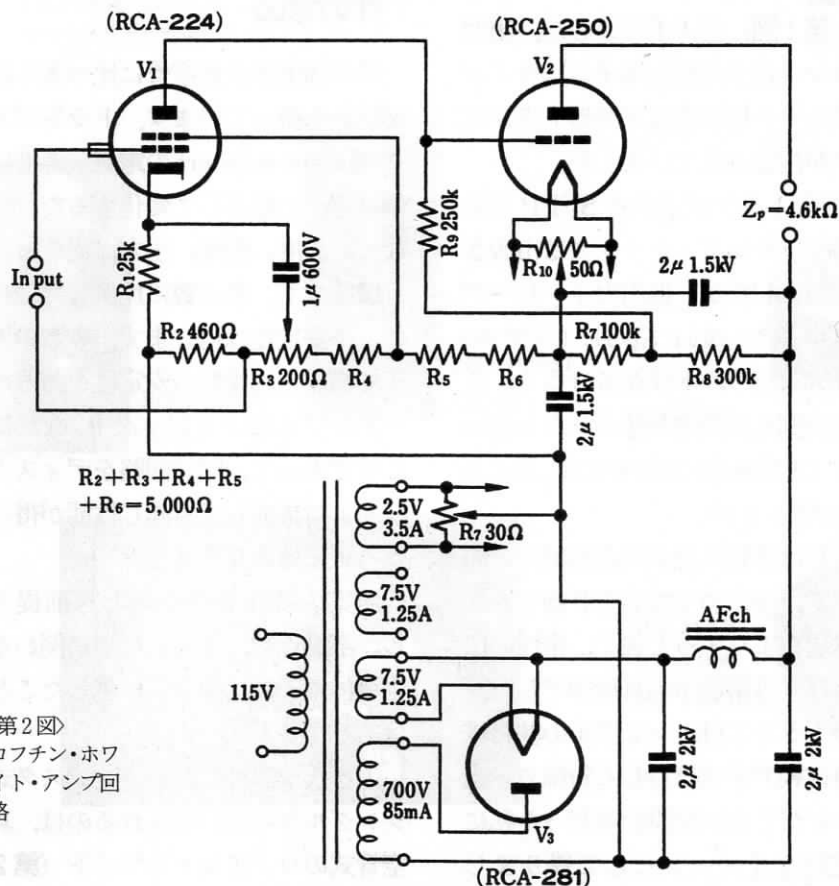
* 電流電圧特性がリニアであって，できるだけ小さい抵抗値（数mΩ）を示すこと．

## 出力素子の選択

第1図は高耐圧のメサ形バイポーラ・トランジスタで設計されています．1970年代初頭まで高耐圧素子はプレーナ形ではなくメサ形でした．コレクタ-ベース接合をフラットにできることからプレーナ形より高耐圧化し易かったからです．

しかし，メサ形に仕上げる工程（薬品によるエッチング）でのバラツキが大きいこと，露出したPN接合面が汚染されやすいことなどの問題がありました．パシベーション技術が確立され，高耐圧素子における主流はプレーナ形へ移り，現在では高圧ダイオードにメサ構造が残されているに過ぎません（ただし，最新のパワーMOS-FETの低オン抵抗を実現するトレンチ構造にメサ形との類似性が感じられます）．

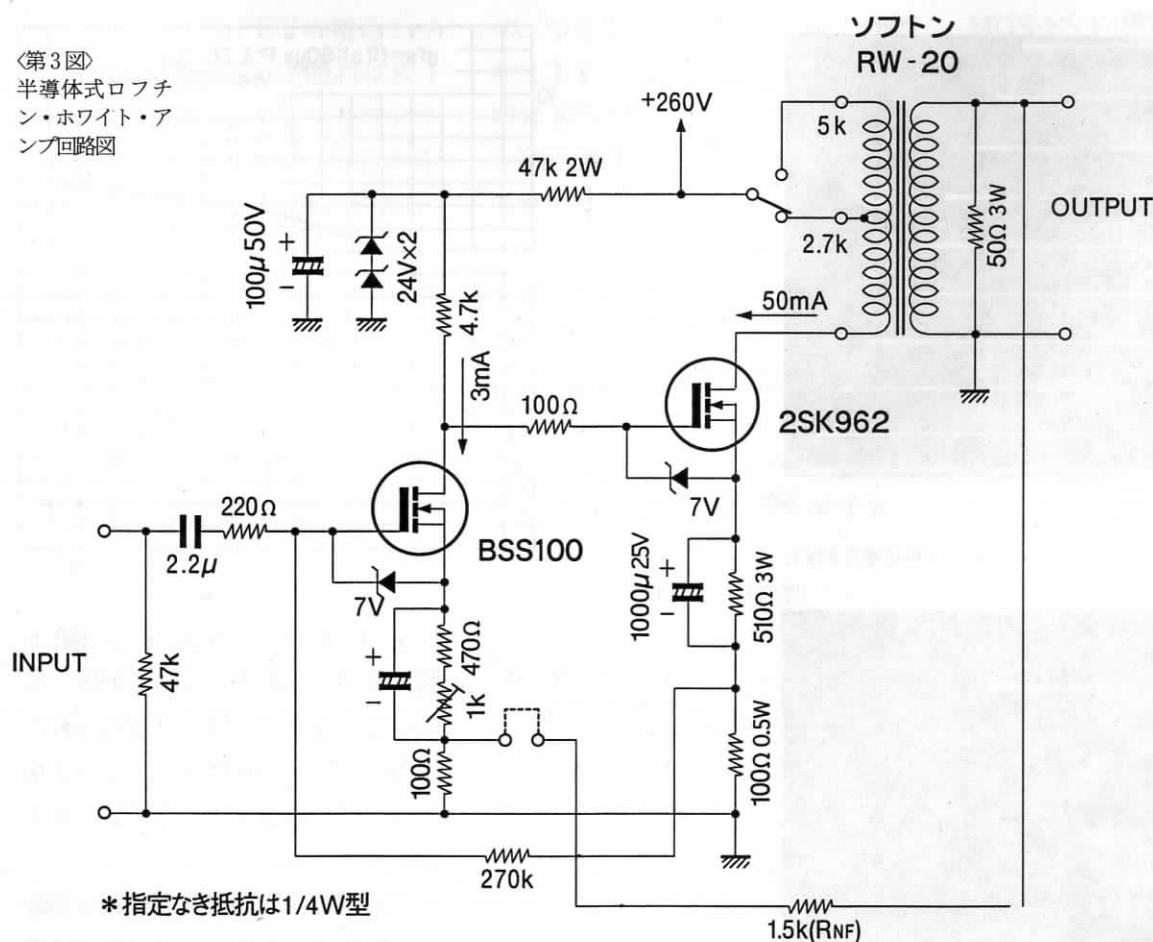
発熱を伴う出力素子に旧来のメサ形トランジスタを採用する場合，回路設計者は徐々にではありますが，コレクタ-ベース間漏れ電流の増加と耐圧の低下を覚悟すべきでしょう．

第3図に全増幅回路を示します．ロフチン・ホワイトを半導体化する

〈第2図〉ロフチン・ホワイト・アンプ回路

〈第3図〉
半導体式ロフチン・ホワイト・アンプ回路図

1000 μF は，オリジナルのロフチン・ホワイトに似せて前段にバイアスを与えるためです．

出力段パワーMOS-FETには手持ちの2SK962（第1表）を用いましたが，耐圧BVDSSが900V，熱抵抗Rth(JC)が1℃/W以下，入力容量Cissが2000 pF以下の素子を選べば品種にこだわる必要はありません．

出力トランスにはソフトン***のRコアトランスを用いました．トランス2次側に接続した50Ωは負荷開放時の過大入力で，パワーMOS-FETに高電圧が印加されるのを抑えるためです．

に際し，30年前には存在しなかったパワーMOS-FETで真空管を置き換えました．パワーMOS-FETはバイポーラ・トランジスタに比べ入力インピーダンスが100倍も高いので，第1図のエミッタ・ホロワを省略しました．こうすると，素子数が2石となりロフチン・ホワイトに似てきます．しかし，真空管に比べて順伝達コンダクタンス $g_{fs}(=g_m)$ のバラツキが大きく，リニアリティも劣る**ので，ソース抵抗100Ωで電流帰還します．リニアリティ，温度特性の弱点はこれで解決されます．

第4図(a)にソース抵抗100Ωを付加した場合の出力特性を示します．$g_{fs}$(≒1/Rs＝1/100)は10 mSの筈ですが，$I_D$が50 mA付近では約9 mSです．飽和電圧が小さく内部抵抗の非常に大きい5極管特性になりました．9Vを中心に4～15V程度のドライブ電圧を与えれば良いことがわかります．

第4図(b)はソース抵抗100Ωのない場合ですが，小電流領域でのリニアリティは非常に悪く使い物になりません．ソース側の510Ωと

** 半導体素子は真空管よりリニアリティが良いとの主張を見かけますが，いかな

● 2 SK 962のヒートシンクは自作した

〈第7図〉電源回路

$V_{OUT}$=0.775V

無帰還時31.5dB

負帰還 $R_{NF}$ 1.8kΩ時

5dB/div

10　100　1k　10k　100k　1M

周波数 (Hz)

〈第8図〉周波数特性

●電源部の内部

す．1kHzでの無ひずみ最大出力は8Ω負荷に対し4Wです．クリップ直前まで2次ひずみが殆どで，前段と出力段の打ち消しは不十分なようです．出力0.02Wから最大出力までの測定において，最低ひずみ率は無帰還時，負帰還時それぞれ0.175%，0.06%です．十分な電流帰還により，小出力時には真空管に劣らないひずみ率が得られます．

**第10図**に出力インピーダンス特性を示します．無帰還時は200Hz～4kHzが58Ωで定電流アンプ的です．トランス2次側に50Ωをスピーカと並列接続しているのに50Ω以上の出力インピーダンスになるのは不可解です．さらに，50Ωを除去すると500Hzでは－337Ωの計算結果になりました．測定方法（8Ω－4Ω切替法）に限界があるのかもしれません．

10Hz，30kHzでは約1Ωと定電圧アンプ並に小さくなりました．可聴周波数帯域での変化が非常に大きく，かつて製作したRCA 1619-COSSAR AT 20によるロフチン・ホワイトとはまったく異なります(**第11図**)．出力段の3極管とパワーMOS-FETの出力特性の違いだけ

〈第9図〉
雑音ひずみ率特性

→↑〈第10図〉
出力インピーダンス特性

〈第11図〉
AT 20アンプの出力インピーダンス特性

でなく，出力トランスも影響しているようです．負帰還時の出力インピーダンスは20 Hz〜20 kHzで約3 Ω一定です．

## 試聴と反省

ソース抵抗，エミッタ抵抗による電流帰還は音質を損なうとの意見もあるようです．しかし，オリジナルのロフチン・ホワイトの半導体化に伴う強力な電流帰還は素子のバラツキを吸収し，破壊耐量で真空管より格段に劣る半導体への高圧印加を容易にします．耐圧と入力容量さえ同等品を選べば，他のパラメータのバラツキを気にしなくても同じ特性を再現できると思います．

先に製作した真空管式のAT 20ロフチン・ホワイト（1989年8月号）および私のリファレンスである武末氏設計801 A並列シングルのコピー（1997年2月号）とによる比較試聴結果は以下の通りです（**第3表**）．ソースは日本オーディオ協会製作のCD「IMPACT-2」，スピーカは概略指定箱入りのロイーネDV 160を用いました．ただし，モノーラルです．

この試聴の直前まで，ソプラノ森麻季の「Bist Du Bei Mir」（S & R）を伸びやかに再生するNFなしの本アンプに十分満足していました．

| | 本アンプ(NF 無) | 本アンプ(NF 有) | AT20 ロフチン・ホワイト | 801A シングル |
|---|---|---|---|---|
| ピアノ | 明るく軽い | バランス良 | 落ち着く | NF 有に類似 |
| ドラム セット | 高域寄り | 低音迫力あり | NF 無に類似 | NF 有に類似 |
| フルート | 生々しい | 同左 | 同左 | 同左 |
| トランペット | 高域寄り | バランス良 | 同左 | 同左 |
| 弦 | 高域寄り | 低音迫力あり | 同左 | 同左 |
| 女性 ボーカル | 輪郭はっきり | 落ち着く | NF 無に類似 | NF 有に類似 |

〈第3表〉音質比較

しかし，あらためて比較試聴すると本アンプ（NF有）が私のリファレンスである武末氏設計801 A並列シングルのコピーに似ていることは意外でした．両アンプの電気的特性は似ていますが，回路および設計方針はまったく異なります．

これまで製作してきた駆動段までを半導体素子，出力段を真空管とする10種余りの異なる方式のハイブリッド・アンプ，およびこのアンプを製作し，ようやく半導体素子が真空管と同等の性能，音質を持ち得ると思い始めたところです．しかしながら，増幅に関わる半導体素子数を少なくしたことに関連付けるには至っていません．

●ヒートシンクをはずしたところ